

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Angin**

Secara singkat, udara yang berpindah disebut angin. Menurut Buys Ballot, seorang ahli dari perancis mengenai ilmu cuaca, Massa udara yang berpindah dari daerah dengan tekanan tinggi ke daerah dengan tekanan rendah disebut angin. Gerakan horizontal massa udara ini dikenal sebagai angin. Anemometer mangkok merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Kecepatan angin diukur dalam satuan kilometer per jam (km/jam) atau knot. (1 knot = 0.5147 m/s = 1.857 km/hour).[9]

Angin dapat bergerak baik secara horizontal maupun vertikal dengan kecepatan yang bervariasi dan berfluktuasi secara dinamis. Perbedaan tekanan udara antara suatu tempat dan tempat lain adalah penyebab utama dari gerakan massa udara ini. Secara umum, Angin selalu bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah.

Angin dapat diklasifikasikan menjadi angin global dan angin lokal. Angin global disebabkan oleh pemanasan matahari yang intensitasnya tinggi di daerah sekitar khatulistiwa. Ini menyebabkan udara panas dari wilayah tropis naik ke atmosfer atas dan bergerak menuju ke arah kutub. Udara dengan suhu rendah dari kutub kemudian bergerak kembali menuju ke khatulistiwa untuk menggantikan udara yang naik tadi.[10]

##### **2.1.1 Proses Terjadinya Angin**

Angin dapat menyeimbangkan tekanan dengan mudah karena angin merupakan gas yang terdiri dari molekul-molekul udara yang bergerak. Perpindahan molekul udara ini menyebabkan tekanan udara bergerak sampai mencapai kesetimbangan. Kesetimbangan ini terjadi pada titik tetap, yang dipengaruhi oleh perubahan fisik seperti suhu udara, siklus siang dan malam, serta kemiringan Bumi terhadap orbitnya. Angin terjadi karena perbedaan tekanan udara

di berbagai daerah udara cenderung bergerak dari daerah dengan tekanan tinggi menuju daerah dengan tekanan dibawahnya.

### 2.1.2 Kekuatan Angin

Semakin cepat angin bertiup, semakin besar kekuatan angin, hal ini mempengaruhi kekuatan angin. Pelaut Inggris bernama Beaufort, pada tahun 1804 membuat daftar skala kekuatan angin yang mencakup berbagai kecepatan angin yang digunakan untuk navigasi / menentukan arah kapal yang ditunjukkan pada gambar berikut.[2]

Kekuatan angin	Kecepatan angin		Nama	Keterangan
	Skala beaufort	m/s		
0	0,0 - 0,5	0 - 1	Angin reda	Tiang asap tegak
1	0,6 - 1,7	2 - 6	Angin sepoi-sepoi	Tiang asap miring
2	1,8 - 3,3	7 - 12	Angin lemah	Daun-daun bergerak
3	3,4 - 5,2	13 - 18	Angin sedang	Ranting-ranting bergerak
4	5,3 - 7,4	19 - 26	Angin tegang	Dahan-dahan bergerak
5	7,5 - 9,8	27 - 35	Angin keras	Batang pohon bergerak
6	9,9 - 12,4	36 - 44	Angin keras sekali	Batang pohon besar bergerak
7	12,5 - 15,2	45 - 54	Angin ribut	Dahan-dahan patah
8	15,3 - 18,2	55 - 65	Angin ribut sekali	Pohon-pohon kecil patah

Gambar 2.1 Daftar Kecepatan Angin

### 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit listrik tenaga bayu mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik melalui turbin, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator dengan memanfaatkan kecepatan angin yang menggerakkan turbin tersebut. Di Indonesia, pembangkit listrik tenaga bayu merupakan jenis pembangkit

listrik nonkonvensional yang masih dalam tahap riset, sehingga belum dapat dikomersialisasikan.[9]

### 2.3 Pengertian Turbin Angin

Turbin angin adalah mesin berputar yang dapat menghasilkan energi mekanik dari energi kinetik angin. Apabila energi gerak tersebut digunakan secara langsung untuk keperluan seperti memompa air atau menggerinda benda, mesin tersebut disebut windmill. Namun, apabila energi gerak dari turbin angin diubah / dikonversikan menjadi energi listrik, maka mesin tersebut disebut turbin angin atau *Wind Energy Converter* (WEC).

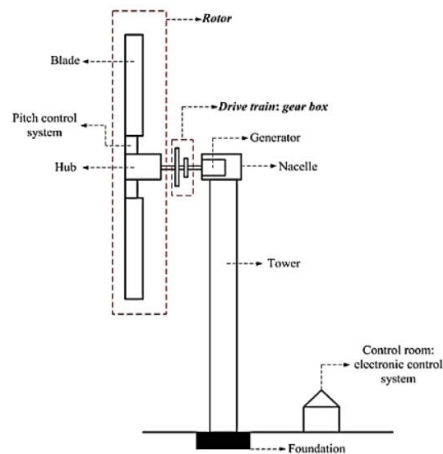
### 2.4 Jenis Jenis Turbin Angin

Dalam perkembangannya, jenis turbin angin terbagi menjadi 2 jenis utama: *Propeller wind turbine* dan *Darrieus wind turbine*. Kedua jenis turbin ini saat ini mendapatkan perhatian besar untuk dikembangkan. Pemanfaatannya yang umum termasuk untuk memompa air dan pembangkit tenaga listrik.

#### 2.4.1 Turbin angin poros horizontal (HAWT).

Propeller wind turbine adalah contoh turbin angin dengan poros mendatar / horizontal, mirip dengan baling-baling pesawat terbang. Turbin angin ini perlu diarahkan menghadap arah angin yang memiliki kecepatan tertinggi. Menurut Mukund R. Patel, Daya yang dihasilkan oleh turbin angin secara linear berkorelasi dengan area yang dilalui oleh bilah rotor. Untuk turbin sumbu / poros mendatar, area yang melewati bilah rotor adalah:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 (m^2) \quad (2.1)$$

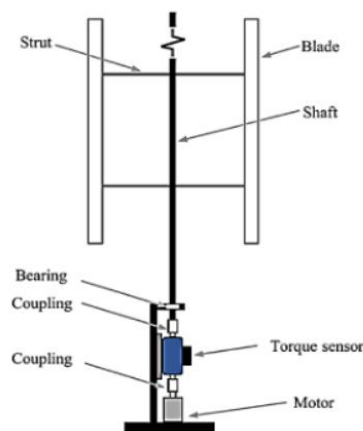


Gambar 2.2 Turbin angin poros horizontal (sumber: iaes.or.id)

### 2.4.2 Turbin angin poros vertical (VAWT)

Sistem turbin angin Darrieus pertama kali dikembangkan oleh GJM Darrieus pada tahun 1920 dan merupakan sistem konversi energi angin yang dikategorikan sebagai turbin poros tegak. Salah satu kelebihan dari turbin Darrieus adalah tidak dibutuhkannya proses kerja berorientasi terhadap arah angin tertinggi (*high wind direction*), seperti yang diperlukan pada *propeller wind turbine*. Karena melibatkan integral elips dalam penentuan luas area sapuan rotor pada *Darrieus wind turbine* maka prosesnya akan menjadi lebih rumit sebagaimana yang disampaikan Mukund R. Patel. Tetapi, untuk menyederhanakan persamaannya maka bilah turbin dapat dianggap sebagai parabola :

$$A = \frac{2}{3} (\text{maximum rotor width at center})(\text{height of the rotor})$$



Gambar 2.3 Turbin angin poros vertical (sumber: iaes.or.id)

## 2.5 Efisiensi Turbin Angin

### 2.5.1 Efisiensi Daya Rotor

Daya angin maksimal yang dapat dihasilkan dari turbin angin dengan luas sapuan rotor A sebagai berikut:

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.2)$$

Jika merujuk pada teori, efisiensi maksimal yang dapat diperoleh rotor pada turbin angin jenis sumbu horizontal menurut ahli Jerman Albert Betz yaitu sekitar 59.3%, yang dikenal sebagai batas Betz (Betz limit), berdasarkan karya ilmuwan Jerman Albert Betz. Namun, pada kenyataannya dilapangan karena kerugian gesekan dan kerugian di ujung blade dan efisiensi aerodinamik rotor, harga rotor ini akan lebih rendah, dengan harga blade yang dirancang dengan baik hanya 0.45. Maka Efisiensi rotor turbin angin menjadi:

$$\eta_{rotor} = C_p = P_t / \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Dimana :

$P_t$  = Daya turbin (watt)

$C_p$  = Coefisien Power

$\rho$  = massa jenis angin ( $\text{kg/m}^3$ )

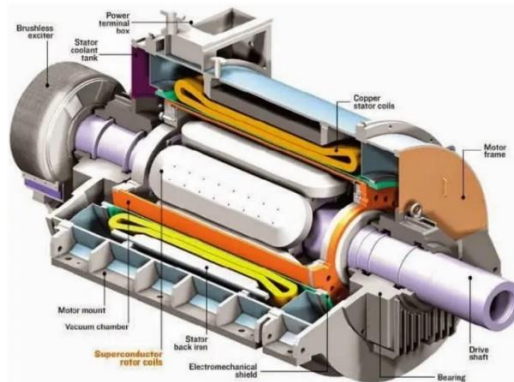
$A$  = Lua penampang melintang aliran ( $\text{m}^2$ )

$v$  = kecepatan angin (m/s)

### 2.5.2 Efisiensi Transmisi dan Generator Gearbox

Efisiensi transmisi gearbox dan bearing dalam turbin angin adalah faktor kunci dalam mengubah laju putar menjadi energi listrik dengan efisien. Secara umum, gearbox dan bearing dalam turbin angin modern memiliki efisiensi tinggi, sering kali mencapai lebih dari 98%. Hal ini penting untuk memastikan bahwa energi kinetik dari rotor turbin angin dapat dikonversikan dengan sedikit kerugian ke energi listrik oleh generator, dan efisiensi generator ( $N_g$ , ~ 80%)[9]. Maka persamaan efisiensi keseluruhan turbin angin dapat dituliskan seperti di bawah ini:

$$\eta_{total} = C_p \cdot N_b \cdot N_g \quad (2.4)$$



Gambar 2.4 Komponen generator (scibrd.com)

## 2.6 Life Cycle Cost (LCC)

LCC (*Life Cycle Cost*) adalah metode perhitungan biaya siklus hidup yang mempertimbangkan berbagai komponen biaya dari awal hingga akhir siklus hidup suatu proyek. Metode ini banyak diterapkan di berbagai bidang dan dapat digunakan untuk menentukan efisiensi penggunaan energi pada bangunan atau menganalisis biaya keseluruhan dan energi pada bangunan yang menerapkan sistem kombinasi energi matahari. Metode LCC membantu mengidentifikasi dan mengevaluasi biaya operasional dan pemeliharaan serta biaya lainnya yang terjadi selama masa pakai proyek atau fasilitas.

Model LCC pada sistem energi yang dikembangkan oleh Departemen Energi AS dan distandarisasi oleh Biro Standar Nasional pada tahun 1980 mempertimbangkan keseluruhan cost yang masuk akal terkait dengan sistem energi dari durasi ke durasi waktu. Ini mencakup biaya oleh fase desain, konstruksi, material, pengoperasian sistem, dan biaya biaya lainnya. Komponen biaya yang dipertimbangkan meliputi biaya investasi awal, biaya perawatan berkala atau tidak berkala, serta nilai sisa atau biaya pemulihan dari aset (*salvage value*). Model ini membantu dalam mengevaluasi total biaya siklus hidup suatu sistem energi, termasuk estimasi biaya operasional dan pemeliharaan selama masa pakai sistem tersebut.[11] oleh karena itu, perhitungan biaya energi selama masa guna adalah :

$$LCC = EC + IC + SV + +NMFOMC + NRC + RC \quad (2.5)$$

Dimana :

LCC : present value dari life cycle cost



- EC : present value dari biaya energy  
 IC : present value dari biaya investasi  
 SV : present value dari salvage  
 NFOMC : biaya operasi diluar biaya pemeliharaan dan bahan bakar  
 NRC : biaya operasi diluar biaya pemeliharaan berulang dan bahan bakar  
 RC : present value biaya berulang atau biaya tahunan

### 2.7 Levelized Cost of Energi (LCoE)

LCoE (Levelized Cost of Electricity) adalah harga di mana energi listrik yang dihasilkan dari suatu sumber energi dapat mencapai titik impas (break even) selama jangka waktu tertentu. Jangka waktu ini biasanya ditentukan berdasarkan masa pakai (lifetime) dari sistem pembangkit tersebut. LCoE merupakan metrik yang umum digunakan untuk membandingkan biaya relatif dari berbagai teknologi pembangkit energi, seperti energi surya, energi angin, atau energi dari bahan bakar fosil. Metode perhitungan LCoE memperhitungkan biaya modal awal, biaya operasional dan pemeliharaan, biaya bahan bakar, serta faktor lainnya untuk menentukan biaya rata-rata per kWh energi yang dihasilkan selama masa pakai sistem.

Levelized cost menggambarkan harga keseluruhan dari biaya investasi, operasional, perawatan, biaya penggantian peralatan, sewa tanah, dan asuransi dari sebuah unit pembangkit. Nilai-nilai ini biasanya dinilai dalam nilai sekarang (*present value*) selama siklus finansial dan masa pakai sistem, kemudian dihitung kembali menjadi cicilan tahunan dengan mempertimbangkan tingkat inflasi. Hal ini membantu dalam menentukan biaya rata-rata dari energi yang dihasilkan oleh fasilitas pembangkit selama masa pakainya. Penjelasan ini dapat dirumuskan dalam rumus LCoE di bawah ini:

$$LCoE = \frac{I + \sum_{t=1}^n \frac{LCC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (2.6)$$

## 2.8 Net Present Value (NPV)

Perhitungan NPV (*Net Present Value*) adalah yang menggunakan tingkat bunga yang sesuai untuk menghitung perbedaan antara nilai investasi saat ini dan nilai penerimaan kas bersih yang dihasilkan dari operasional cash flow. NPV digunakan sebagai kriteria penilaian kelayakan suatu proyek, di mana proyek dinyatakan menguntungkan jika NPV positif (nilai sekarang penerimaan total cash bersih lebih besar dari total nilai sekarang investasi). Sebaliknya, proyek dianggap tidak menguntungkan jika NPV negatif (nilai saat ini pendapatan lebih kecil dari nilai investasi). Dengan demikian, NPV membantu dalam mengevaluasi apakah suatu investasi atau proyek dapat memberikan keuntungan finansial yang diharapkan dalam jangka waktu tertentu. Sehingga dapat dirumuskan seperti di bawah ini :

- apabila..NPV > 0 : proyek..dinyatakan layak
- apabila NPV < 0 : proyek dinyatakan tidak layak
- apabila NPV = 0 : proyek tidak untung & tidak rugi

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (2.7)$$

Dimana :

B<sub>t</sub> : laba penjualan tahun ke-t

C<sub>t</sub> : nilai investasi kotor periode-t

n : jangka waktu proyek

i : interest rate

## 2.9 Internal Rate of Return (IRR)

*Internal Rate of Return* (IRR) adalah tingkat suku bunga (*discount rate*) yang menghasilkan nilai *Net Present Value* (NPV) dari proyek adalah nol atau impas. Dengan kata lain, IRR adalah tingkat suku bunga di mana nilai sekarang dari arus kas bersih dari proyek sama dengan nilai sekarang dari investasi awal proyek tersebut. Tingkat IRR digunakan untuk menilai kelayakan suatu proyek



dengan cara membandingkan IRR dengan tingkat pengembalian yang diharapkan atau tingkat diskonto alternatif lainnya. Semakin tinggi IRR dari suatu proyek, semakin menguntungkan proyek tersebut dianggap dari segi keuangan. Maka untuk mencari nilai IRR digunakan persamaan di bawah ini:

$$IRR = i \frac{NPV}{NPV^1 - NPV^2} (i^1 - i^2) \quad (2.8)$$

Dimana :

I : nilai suku bunga

$i^1$  : nilai suku bunga yang bisa menghasilkan nilai positif NPV.

$i^2$  : nilai suku bunga yang bisa menghasilkan nilai negatif NPV

$NPV^1$  : nilai positif NPV

$NPV^2$  : nilai negatif NPV

## 2.10 Payback Period (PBP)

*Payback period* merupakan periode waktu yang dibutuhkan agar dapat melunasi kembali pengeluaran investasi awal dengan menggunakan cash flow bersih (*net cash flows*). Analisis payback period berguna untuk mengevaluasi seberapa cepat investasi dapat menghasilkan kembali modal yang diinvestasikan. Meskipun sederhana, metode ini memberikan informasi tambahan terkait dengan likuiditas dan risiko investasi, namun tidak memberikan informasi tentang profitabilitas jangka panjang atau nilai waktu uang dari aliran kas.[12]

$$PP = n + \frac{(a-b)}{(c-b)} \times 1 \text{ tahun} \quad (2.9)$$

Keterangan:

n : Tahun terakhir dimana arus kas sebelum menutup investasi semula

a : harga modal awal

b : nilai keseluruhan cash flow pada periode ke n

c : nilai keseluruhan arus kas pada periode ke n + 1

